

ステンレス鋼製貯水槽の地震による側板破損原因の解明 および地震対策案の検討

Elucidation of the damage caused by earthquake of stainless steel water storage tank side plate
and examination of earthquake countermeasures

佐久間 真輝[†], 鈴木 森晶^{††}, 青木 大祐^{†††} 嶋口 儀之^{††}, 宗本 理^{††}
Masaki Sakuma[†], Moriaki Suzuki^{††}, Daisuke Aoki^{†††}, Shimaguchi Yoshiyuki^{††}, Munemoto Satoru^{††}

Abstract The water storage tank damages by earthquakes have been reported. The damaged water tanks lost storage capacity. Therefore, it is impossible to supply satisfactorily water to evacuees. It is important to prevent such secondary disasters. Therefore, it is necessary to reduce damage to tanks due to earthquakes.

In this study, seismic excitation experiments have performed to investigate the damage mechanism of the stainless steel panel tank. The purposes of this study is to clear the damages by focusing on the panel joints. And, clear the damage mechanism under the dynamic water pressure. From these results, seismic resistant method design will be suggested.

1. はじめに

我が国では地震が発生する度に、石油タンクおよび給水タンクが損傷する被害が発生している^{1), 2)}。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震において、水道施設や病院、学校等の公共施設や集合住宅などに設置されている SUS 製および FRP 製の貯水タンクに亀裂や破損が発生したことで、タンクは貯水機能を保つことができず、避難を行った人々に対し十分な生活用水を配給することができないという二次災害が発生した³⁾。タンクの破損事例を調べると、写真-1 のようにタンクが大きく破損したものもあれば、写真-2 のようにパネルの接合部にわずかな亀裂が入り漏水したものもある^{4) ~ 6)}。2016 年に発生した熊本地震でもこのような被害により、二次災害をもたらした⁶⁾。この種の被害は、兵庫県南部地震や、能登半島沖地震でも発生しており、内陸直下型地震および海溝型地震を問わず発生する事例である。今日、南海トラフ巨大地震の発生が想定されており、地震によるタンク破損への検討は急務である。

現在までにタンク破損の原因として、則竹らが指摘している長周期地震動により貯水槽の内溶液が共振してその表面が激しく上下動するスロッシング現象および、地震動により貯水槽のパネルと内溶液が連成振動することで、パネル中央付近が大きく変形するバルジング現象が要因であると考えられている^{7) ~ 12)}。

上記の現象のうち、スロッシング現象において対策案が報告されている。本研究グループにおいては則竹らによって波高抑制を目的としたフィルターを用いる方法によって高い抑制効果が期待できると報告している^{7), 13), 14)}。また曾根らは金属製の多孔板を用いることでスロッシング現象の波高を抑制できることを報告している⁹⁾。しかし、バルジング現象によるタンク破損のメカニズムおよび、明確な抑制効果がある対策はあまり報告されていない。

本研究では、ステンレス鋼製パネルタンクの破損原因を実験的に解明、考察を行う。この情報をもとに、ステンレス鋼製パネルタンクの効果的なバルジング対策方法を提案することを目的とする。具体的に破損原因の解明としては、破損部分の接合部を調べどのような状況で破損しやすいかを調べる。また、地震時のタンク内部における動水圧を計測しどのような傾向があるか調べる。バルジング対策としては高減衰ゴムによる免震対策および内部補強材追加による耐震対策を検討する。

[†] 愛知工業大学大学院工学研究科（豊田市）

^{††} 愛知工業大学工学部土木工学科（豊田市）

^{†††} 森松工業株式会社（本巣市）

2. 破損原因の解明

2・1 実験概要

全てのタンクがスロッシングやバルジングで破損したとは断定できず、破損の原因は解明されていない。被害事例の中には、タンクのパルジング固有振動数と一致しない場合においても、タンク側面に内容液の慣性力で水圧が作用し、タンクが破損した例もある。タンクの損傷のほとんどは、パネル接合部に亀裂が入ることであるが、どの部分からタンクの損傷が起こるのかについてはいまだに不明である。

そこで、パネルタンクの損傷で特に多いとされるパネル接合部に着目し、ステンレス鋼製パネルタンクのパネル接合部に π 型変位計を取り付け、実験を行った。そして、様々な振動を与えた際にパネル接合部がどの程度開くかを測定する。そして、パネル接合部の開きや動水圧、加速度を比較し、それらの因果関係を調べる。

または、振動時のタンク内部の水の動きについて着目する。タンク内部の動水圧については詳しい研究事例があまりない。スロッシング、バルジング挙動時では水中でどのような振動伝達をし、パネルにどんな影響を与えタンク破損につながっているのかは不透明である。そこで、水中での振動伝達挙動を測定するためにタンク内部に圧力センサーを設置し、動水圧分布を測定した。計測した動水圧を用いて、タンク破損原因を検討する。

本実験では写真-3 で示すように幅 3000mm、奥行 3000mm、高さ 3000mm のステンレス鋼製パネルタンク(森松工業株式会社製、以下タンク)を用いて、常用水深である水深 2700mm で加振実験を行った。厚さは上段 1.5mm、中段 2.0mm、下段 2.5mm で材質は SUS304 を使用する。愛知工業大学所有の屋外振動台を用いて、1 軸正弦波の地震波加振と定常波加振を行った。

2・2 実験条件および計測項目

実験では愛知工業大学所有の屋外振動台を用いて、地震波および正弦波の 1 軸加振を行った。実験パラメータを表-1 に示す。入力振動数は、0.1Hz~6.0Hz の範囲で試験を行い、どの振動数が最も破損しやすいかを判明させる。そして、各振動数においてタンクのパネル接合部の開き量を計測することによりタンク破損の検討を行う。

さらに、地震波試験を行う。地震波は、振動台の加力限界および出力範囲外を考慮し以下の割合に低減させた地震波を入力し、計測を行う。地震波試験には、兵庫県南部地震 NS 方向変位 30%相当、十勝沖地震 NS 方向変位 80%相当、東北地方太平洋沖地震 NS 方向変位 20%相当を用いた。

パネル接合部に着目する場合およびタンク内動水圧に着目する場合で加振振幅および加振方向角が異なる。

2・2・1 パネル接合部に着目する場合

測定する機器は、 π 型変位計として写真-4 で示した株式会社東京測器研究所製「PI-5-100」、側板水圧計として写真-5 で示した株式会社共和電業製「PGM-05KG」を用いる。 π 型変位計と側板水圧計の設置位置を図-1 に示す。

各点のパネル接合部の開き量を検討するために、 π 型



写真-1 ステンレス製貯水タンク破損 6)



写真-2 パネル接合部での漏水 6)



写真-3 ステンレス鋼製パネルタンク

変位計を用いて測定をする。測定位置に関しては、平面パネル一面と隅角部、側面パネルの一部に取り付け、各点のパネル接合部の開き量を測定する。これらの位置に π 型変位計を取り付ける理由は、振動台を矢印の方向に加振させた時に水圧が平面パネル一面に当たるため、その部分のパネル接合部の開き量が大きくなると考えたためである。また、隅角部に関しては、過去の文献よりパネル接合部が大きく変形し破損するという報告が多数あったためである⁸⁾。側面パネルの一部に関しても、パネル接合部が大きく変形している可能性があるために測定した。水圧計の設置位置は高さ、節点部分とパネル中央部の2500mm, 2100mm, 1500mm, 1100mm, 500mm, 100mm、計6箇所で計測を行う。

2・2・2 タンク内動水圧に着目する場合

タンク内動水圧に着目する場合での加振振幅について示す。正弦波加振では振幅を0.10Hz～1.00Hzでは±2.5mm, 1.10Hz～6.00Hzでは±1.0mmに設定して加振を行った。振動数を0.10Hz～1.00Hzでは0.10Hz刻みを基本とし、スロッシング振動1次モード付近の0.45Hz～0.55Hz、スロッシング振動2次モード付近の0.85Hz～0.90Hzでは0.01Hz刻みで計測する。1.10～6.00Hzの範囲では、0.5Hz刻みを基本とし、バルジング振動付近の4.50Hz～5.50Hzでは0.1Hz刻みで行った。

すべての水圧計のサンプリングタイムは1msで計測した。側壁水圧計は図-1(b)で示したように高さ2500mm, 2100mm, 1500mm, 1100mm, 500mm, 100mmの位置に設置する。タンク内部の水圧計は株式会社共和電業製「PS-05KD」を用いた。水中で使用できるように写真-6に示すように塩ビパイプにシーリング材を充填することで防水加工を行った。タンク内部の水圧計は高さ2500mm～0mmを500mm刻みにした位置を基本とし図-1(c), (d)のように設置する。

2・3 パネル接合部の開き量に着目した検討

2・3・1 水圧-パネル接合部の開き量関係

今回、スワイプ試験を行った。 π 型変位計の値に関しては、実際に計測した値を半分にした値を示す。ただし、M3, M4, M5の隅角部については、計測した値をそのまま示す。また、静水圧による接合部の開き量は考慮しない。

実験結果は一例としてとして高さ2500mmの水圧およびパネル接合部の開き量と入力振動数の関係を図-2に示す。なお、水圧計については、高さ2500mmのP1、パネ

ル接合部の変位については高さ2500mmのM3, M8, M13を使用する。

左側の縦軸が動水圧を加振力で除した応答動水圧で、右側の縦軸がパネル接合部の開き量を加振力で除した値の最大応答開き量を示す。変位の値は、引張はプラス、圧縮はマイナスで算出されるが絶対値の大きい値を示した。

図の関係を見ると最大応答動水圧、最大応答開き量の波形は極めてよく似ていることが分かる。また、0.5Hzと4.5Hzにピークがある結果となった。この理由として、0.5Hz付近では、スロッシング現象が発生し、上部で水圧および変位の値が大きくなったと考えられる。一方4.5Hz付近はバルジング現象が起こったために水圧、パネル接合部の開き量が中段から上段にかけて大きくなったと考えられる。動水圧と開き量の傾向から動水圧とタンクのパネル接合部の開き量は連成していると考えられる。

2・3・2 パネル接合部での開き量に関する検討

スロッシング現象とバルジング現象での検討を図-3の(a)-(b)で検討する。0.5Hzではスロッシング現象により、パネル接合部の開き量を加振力で除した値が大きくなったと考えられる。また、4.5Hzではバルジング現象により、パネル接合部開き量を加振力で除した値が大きくなったと考えられる。しかし、両者を比較すると4.5Hzのほうがその値が大きいことが分かった。このことから、スペクトルピークが同調したときに、開き量が大きくなるものの、それ以外の振動数帯では、パネル接合部の開き量にほとんど変化がないことも確認された。

2・4 タンク内部の動水圧に着目した検討

今回、様々な振動を与えた際にタンク内部の動水圧を測定した。そして、側壁との関係を調べることににより、ステンレス鋼製パネルタンク破損のメカニズムについて検討を行った。

実験結果はA軸での結果を高さ-水圧関係および水圧-側壁からの距離関係の図に示す。スロッシング1次モードの結果を図-4および図-5に、バルジングの結果を図-6および図-7に記す。

図-4および図-5よりスロッシング1次モードでは、底面付近は動水圧の変化は少ない。側壁付近では水深が浅いほど動水圧が高いが、それ以外の部分では水深の違いによる動水圧の差が少ない。図-6および図-7よりバルジングでは、側壁の動水圧は高さ1000～1500mm付近が最も高い。タンク内の動水圧は水深に比例して高くなる。側壁からの距離に比例して動水圧は低くなる。

表-1 実験パラメータ

正弦波 試験	水深(mm)	2700
	入力振動数(Hz)	0.1~6.0
地震波 試験	入力地震波	1995 年 兵庫県南部地震 JMA 神戸 NS30%
		2003 年 十勝沖地震 苫小牧 NS80%
		2011 年 東北地方太平洋 沖地震 今市 NS20%



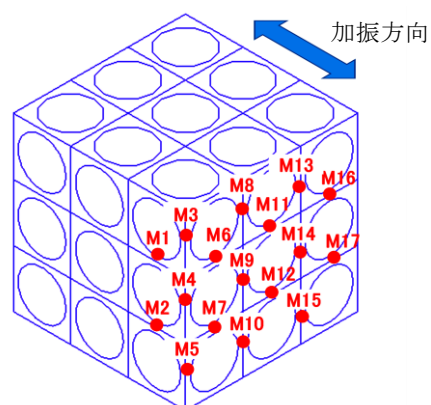
写真-4 π型変位計



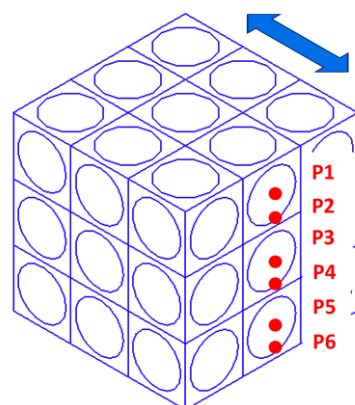
写真-5 側壁水圧計



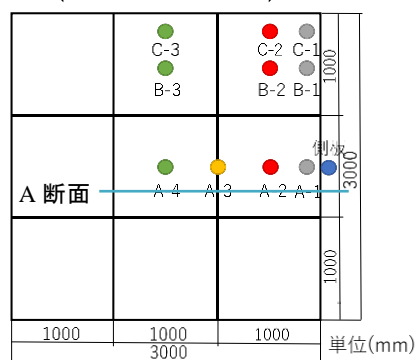
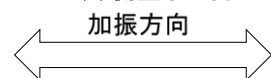
写真-6 タンク内部水圧計



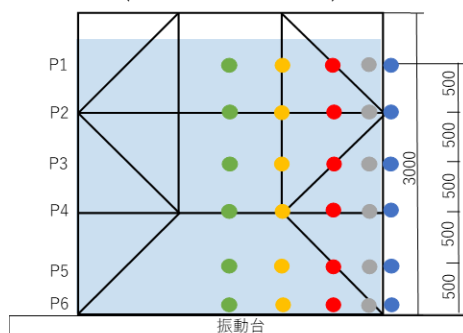
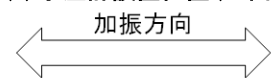
(a) π型変位計



(b) 側壁水圧計



(c) 水圧計設置位置(上面図)



(d) A断面水圧計設置位置(側面図)

図-1 計測機器設置位置

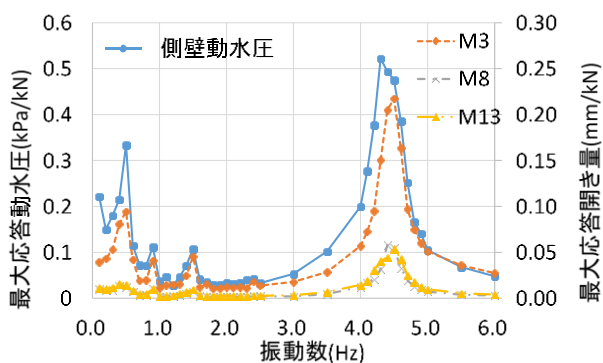


図-2 スイープ試験(H=2500mm)
動水圧および開き量-振動数関係

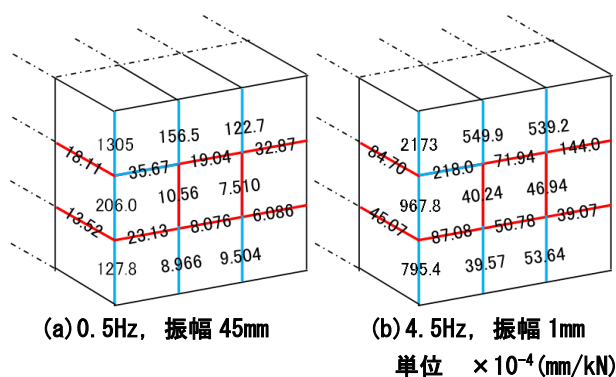


図-3 開き量-加振力比

3. 既設タンクの制振装置による地震対策の検討

第2章ではタンク破損の原因は側板にかかる動水圧と説いた。タンクの側壁に大きな水圧がかかるのはスロッシングまたはバルジングの場合である。スロッシング対策については則竹および黒田らが対策案を挙げている。

しかし、バルジング対策があまり報告されていないため、今章以降はバルジング対策について検討をする。

構造物の地震対策として免震または制振装置を構造物基部に設置する方法がある。同じように免震または制振装置をタンク基部に設置し、地震動をタンクに伝えないことでバルジング対策になるか検討する。本研究は高減衰ゴム(以下ゴム)を用いた制震装置をタンク基部に設置し、加振実験を行う。

3・1 実験概要

写真-3のタンクを愛知工業大学所有の屋外振動台を用いて、1軸正弦波の地震波加振と定常波加振を行った。実験パラメータの詳細を表-2に記す。定常波加振では振幅を $\pm 1.0\text{mm}$ に設定して加振を行った。0.50~6.00Hzの範囲では、0.5Hz刻みを基本とし、バルジング振動付近では0.1Hz刻みで計測を行った。

計測機器として、図-1(b)で用いたタンク側板の水圧計を用いた。水圧計は高さ2500mm, 2100mm, 1500mm, 1100mm, 500mm, 100mmの位置に設置した。サンプリ

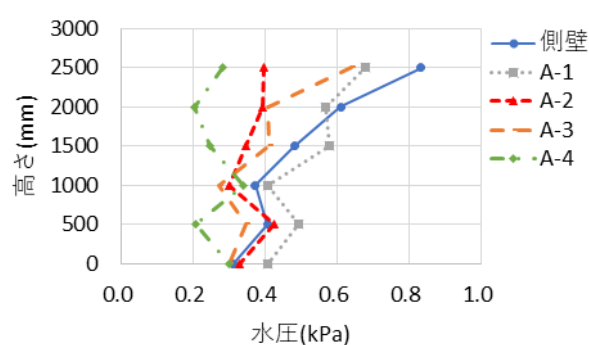


図-4 高さ-水圧関係(スロッシング1次モード)

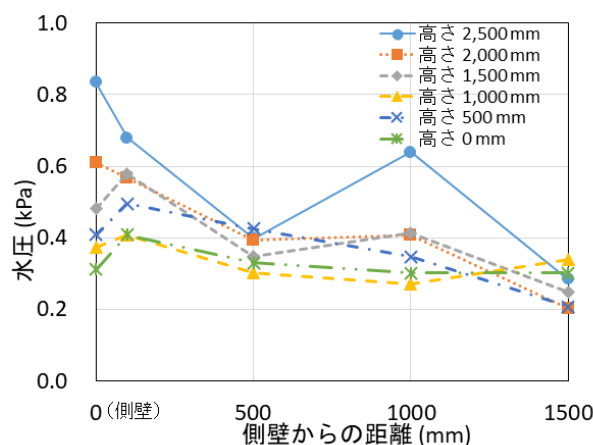


図-5 水圧-側壁からの距離関係(スロッシング1次モード)

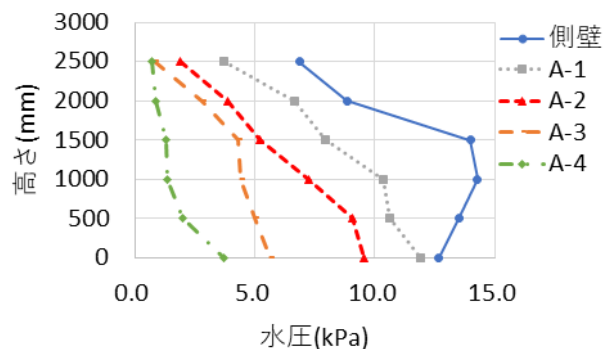


図-6 高さ-水圧関係(バルジング1次モード)

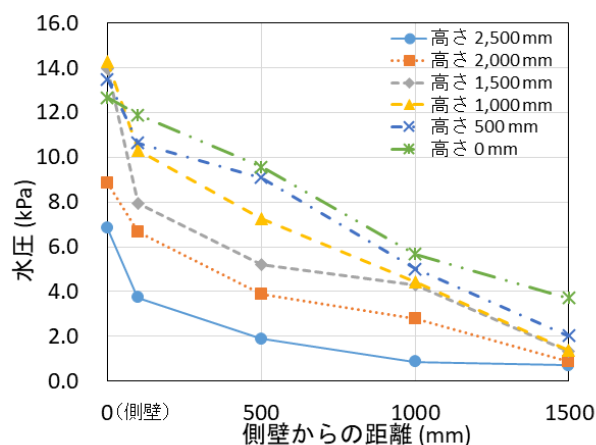


図-7 水圧-側壁からの距離関係(バルジング1次モード)

ングタイムは 1ms で計測を行った。

実験の結果より非制震した場合および高減衰ゴムで制震した場合の動水圧を比較し、高減衰ゴムによりタンク破損の対策になるか検討を行う。

また、ゴムは温度変化により性能が変化する性質を有している。そこで、高減衰ゴムおよび天然ゴムを用い 0℃ から 40℃ の条件下で加振実験を行う。そして、ゴムの温度変化による動水圧低減効果の変化を明らかにする。

3・2 高減衰ゴムのパラメータ

高減衰ゴムを用いた制振装置を使用し一軸加振実験を行う。得られた値を非制震した場合の実験値との比較を行う。結果からどの程度の減衰効果が見込めるか比較を行うにあたりゴム材質の比較を行う。そして、各ゴムの温度別にした動水圧低減効果について検討を行う。

高減衰ゴムとして用いるゴムは内外ゴム株式会社製「ハネナイト GP60L, MP40, MP60, CP55S」と、「天然ゴム NR60」を用いる。

制震装置は、縦、横、板厚が 150mm×150mm×10mm のゴムを使用する。表-3 に使用するゴムの特性パラメータを示す。特性として GP60L は一般用、MP40 および MP60 は広温度域、CP55S は耐寒性用、NR60 は天然ゴムである。図-8 に温度変化によるゴムの硬度を示す。硬度は 0℃ から 40℃ の温度域で、GP60L は約 2 倍、MP40 は 1.5 倍、MP60 は 1.3 倍、CP55S は 1.2 倍変化する。

高減衰ゴムを用いた制振装置はタンク基部にある既存のボルト穴を活用し設置を行う。鋼板の板厚を 9mm にし、M20 ボルトを溶接した。ボルトとナットを用いて制振装置を指圧接合する。用いた鋼板は縦 200mm、横 270mm、板厚 9mm の鋼板である。鋼板とゴムは接着剤を使用し接合する。制振装置は図-9 のように 8 つ設置する。実際に実験時に設置した様子を写真-7 に示す。

3・3 ゴム種類比較

高減衰ゴムをタンク底部に設置した場合の実験結果を図-10 に示す。

高減衰ゴムの種類を変えた場合の外気 35℃ 付近での実験結果である。結果より、どのゴムを用いてもバルジ固有振動数が短周期側に移動した。GP60L は 3.6Hz、MP40 は 2.9Hz になった。一番大きな低減効果を発揮したのは高温温度域に対応した MP40 であった。

3・4 各ゴムでの温度変化による動水圧低減の比較

加振実験はゴムが 0℃ 以上 10℃ 未満、10℃ 以上 20℃ 未満、20℃ 以上 30℃ 未満、30℃ 以上 40℃ 未満の 4 パターン行う。MP60 のみ 0℃ 以上 10℃ 未満、30℃ 以上 40℃ 未満の 2 パターン行う。各ゴムの比較を行ううえで、計測で用いたすべての水圧計の最大値を用いる。

GP60L を設置した際の入力振動数と最大応答水圧の関係を図-11 に示す。非制震と比較すると、0℃ 以上 10℃

表-2 実験パラメータ

正弦波 試験	水深(mm)	2700
	加振方向角	0°
	入力振動数(Hz)	0.5~6.0
	加振振幅(mm)	±1.0
地震波 試験	入力地震波	2003 年 十勝沖地震 苫小牧 NS80%
		2011 年 東北地方太平洋沖地震 今市 NS20%

表-3 ゴムの特性パラメータ

項目	GP60L	MP40	MP60	CP55S	NR60
硬さ (タイプA)	55	39	50	49	60
最大伸び (%)	810	500	350	830	410
引張強さ (kgf/cm ²)	85	61	79	100	84
圧縮永久 ひずみ(%)	16	13	9	25	23
備考	一般用	広温度域		耐寒性用	天然ゴム

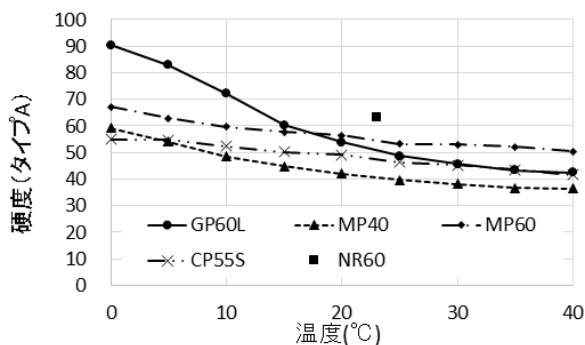


図-8 ゴム硬度の温度依存性

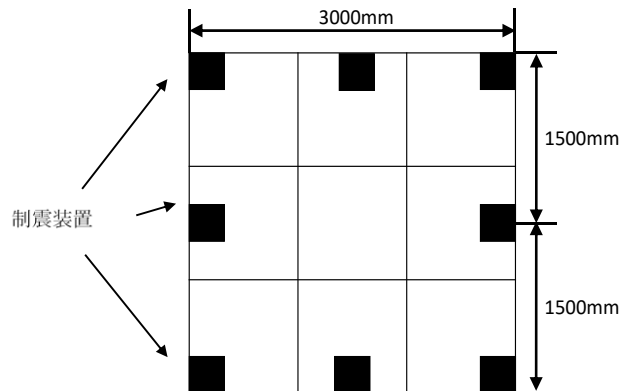


図-9 制振装置配置位置

未満では水圧低減率は 9%だが、30℃以上 40℃未満は 54%と温度によって低減率にばらつきがみられる。低減率にばらつきがあり、通年で一定の水圧低減効果は期待できないと考える。

MP40 を設置した際の入力振動数と最大応答水圧の関係を図-12 に示す。非制震と比較すると、4 パターン全ての温度域で約 70%低減した。振動数に着目すると、0℃以上 10℃未満の最大応答水圧をとる入力振動数は 4.15Hz、30℃以上 40℃未満の最大応答水圧をとる入力振動数は 2.9Hz と温度によって振動数にずれが生じている。これは温度上昇によりゴムの固有振動数が小さくなったためである。

MP60 を設置した際の入力振動数と応答水圧の関係を図-13 に示す。非制震と比較すると 0℃以上 10℃未満および 30℃以上 40℃未満の 2 パターンともに約 50%の動水圧低減効果がみられる。

CP55S を設置した際の入力振動数と応答水圧の関係を図-14 に示す。非制震と比較すると、0℃以上 10℃未満と 10℃以上 20℃未満における低減率は 66%だが、20℃以上 30℃未満と 30℃以上 40℃未満は約 60%と全ての温度域で CP55S より低減率が小さい。また温度により低減率に多少のばらつきがみられる。

NR60 を設置した際の入力振動数と応答水圧の関係を図-15 に示す。非制震と比較すると、4 パターン全ての温度域で低減率が約 30%であり、大きな低減率は期待できない。



写真-7 制振装置を設置した様子

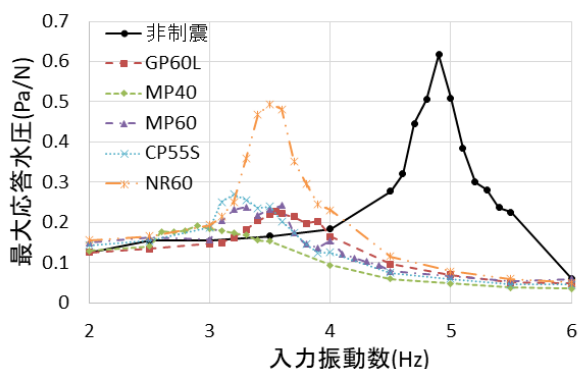


図-10 応答水圧-振動数関係(ゴム種類の検討)

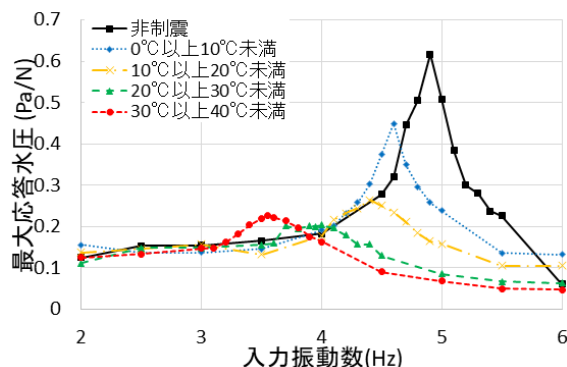


図-11 温度に着目した応答水圧-振動数関係 (GP60L)

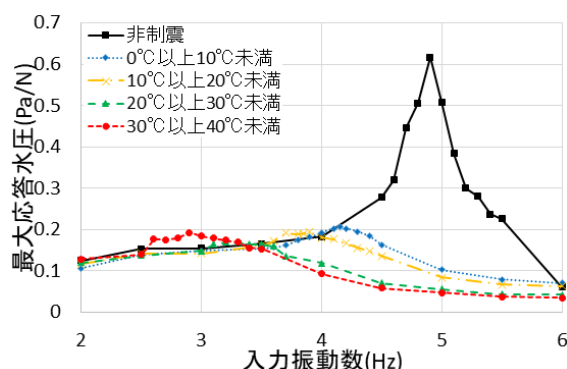


図-12 温度に着目した応答水圧-振動数関係 (MP40)

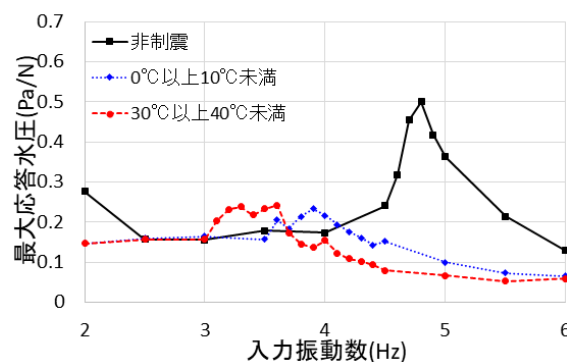


図-13 温度に着目した応答水圧-振動数関係 (MP60)

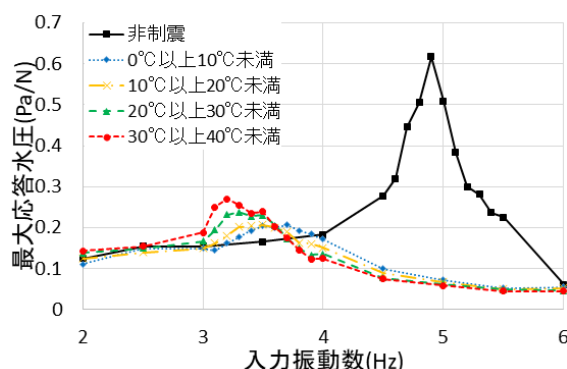


図-14 温度に着目した応答水圧-振動数関係 (CP55S)

4. 既設タンクの補強材追加による地震対策の検討

バルジング現象を抑制するために、バルジング現象によって発生するタンクの変形を内部から抑制し、タンクの破損を防ぐことを目指す。そこで、ステンレス鋼製パネルタンク内部にある既存の補強材に加えて、さらに補強材を追加する。これによりタンクの剛性を上昇させる。補強材を追加したタンクを振動台で加振する。補強を追加したタンクの変形はどの程度抑えることができるのか、既存のタンクの実験結果と比較検討を行う。

4・1 実験概要

写真-3のタンクを愛知工業大学所有の屋外振動台を用いて、1 軸正弦波の地震波加振と定常波加振を行った。実験パラメータの詳細を表-2 に記す。定常波加振では振幅を $\pm 1.0\text{mm}$ に設定して加振を行った。0.50~6.00Hz の範囲では、0.5Hz 刻みを基本とし、バルジング振動付近では0.1Hz 刻みで計測を行った。

計測機器として図-1(b)で示したタンク側板に水圧計を高さ 2500mm, 2100mm, 1500mm, 1100mm, 500mm, 100mm の位置に設置した。また、タンクの面外変位を株式会社キーエンス製「IL-600」で測定した。測定には変位計を鉛直方向補強追加の場合は 3000mm, 2000mm, 1000mm, 0mm, の位置で測定。鉛直方向補強追加の場合は 3000mm, 2500mm, 1500mm, 1000mm, 500mm, の位置で測定した。変位計の測定位置詳細を図-16 に示す。サンプリングタイムは 1ms で計測を行った。

補強材を追加する位置は図-17 に示した鉛直方向に追加する場合、および図-18 に示した水平方向高さ 1000mm に追加する場合の合計 7 通りである。追加補強材はすべて SUS304 の長さ 1200mm, 幅は 65 mm, 厚さは 6 mm のアングル材を使用する。ここで用いた追加補強材はタンク 0~1000mm にある既存の補強材と同じ規格である。

補強材を鉛直面中央列に追加した理由としては、既存の補強では中間列には補強が入っていない。中間部に荷重方向と平行に補強を追加することで、タンク内の補強がトラスの役割を果たし、側板の面外変位抑制ができると考えたためである。また下段に補強材を追加しない理由は、施工時にタンク底部に穴をあける可能性があるからである。漏水はタンクの貯水機能を失うことにつながるため施工を行わない。

補強材を高さ 1000mm 水平面に追加した理由としては、図-6 よりバルジング振動時の動水圧は 1000~1500mm が最も高い。このことより、既存の補強材がある高さ 1000mm に部材を追加した。4~6 案のように隅角に補強材を追加するのは、バルジング現象により矩形タンクが丸く膨張するのを防ぐためである。同様に 7 案では中心の列で膨張を防ぐことを目的とする。

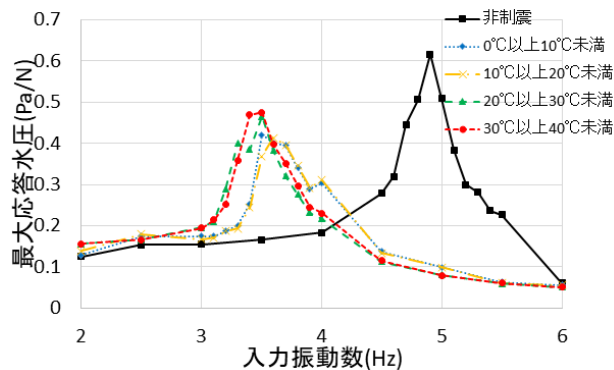
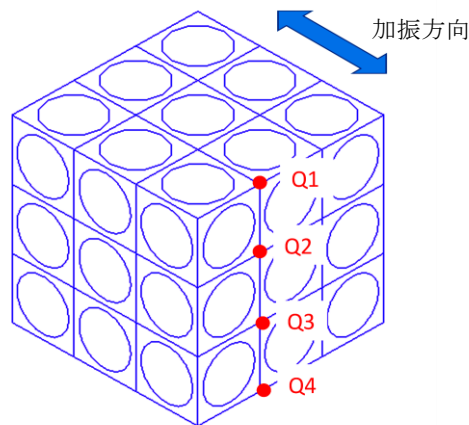
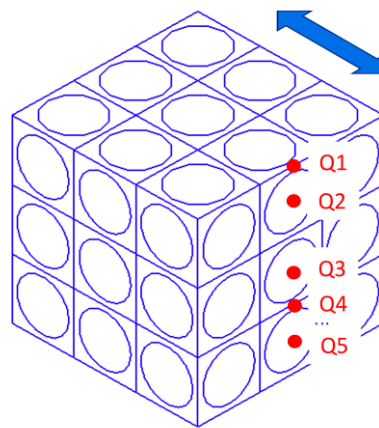


図-15 温度に着目した応答水圧-振動数関係 (NR60)



(a) 鉛直面方向補強追加の場合



(b) 水平面方向補強追加の場合

図-16 面外変位測定位置



写真-8 タンク補強材追加例 (1 案)

4・1 実験結果

実験結果から鉛直方向補強の結果を図-19 に、水平方向補強の結果を図-20 に示す。それぞれ(a)には最大動水圧を加振力で除した最大応答水圧と入力振動数の関係を表した図を示す。(b)にはタンク基部からの高さと同側壁の最大面外変位の関係を示した。

図-19(a)より、鉛直方向に補強材を追加した場合、バルジング固有振動数を 0.3Hz 高めることができた。また、補強材を追加したことによる水圧の顕著な変化はない。また、図-19(b)より 1～3 案の鉛直部材を追加したすべての案で面外変位の低減が確認できた。3 案では高さ 1000mm で変位を約 50%，高さ 2000mm で約 40%，高さ 3000mm で約 30%低減した。1, 2 案では、約 10～30%の変位低減ができた。

図-20(a)より、水平方向に補強材を追加した場合、最大応答水圧はすべての案で 0.1Pa/N 以上減少している。またバルジング固有振動数に変化はない。図-20(b)より、水平面に補強材を追加したことによりすべての案で変位は減少しているが 4～6 案は近似した結果となった。高さ 1000mm の低減効果が一番高いのは 4 案の 24%である。二番目に高いのは 5 案の 21%である。

双方の結果から、鉛直方向に追加部材を増設した場合のほうが高い変位抑制効果が期待できる。

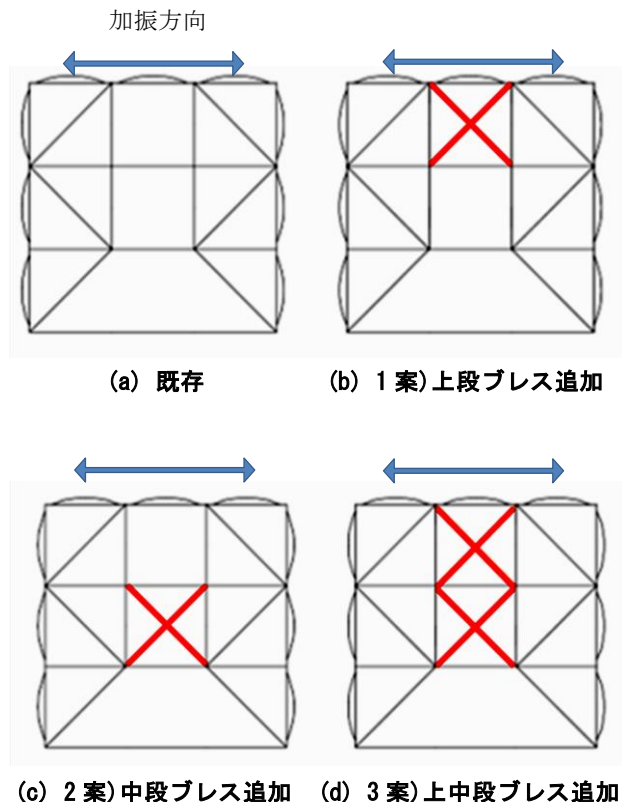


図-17 鉛直面補強案側面図

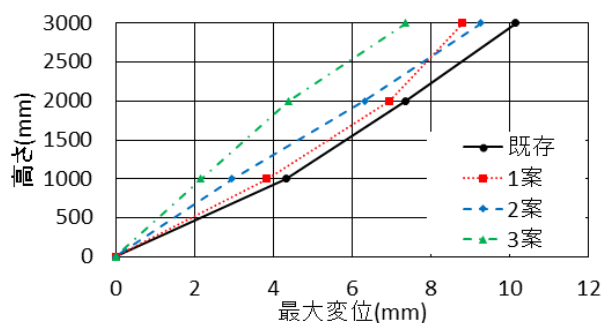
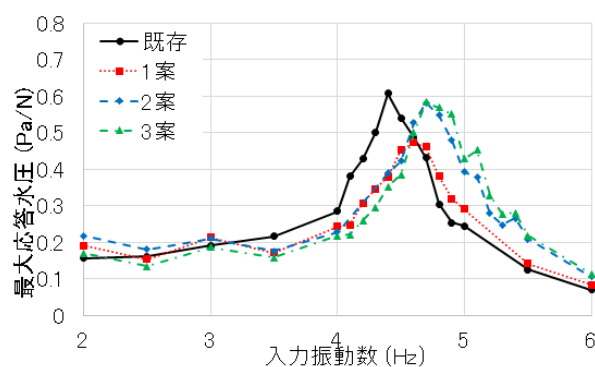
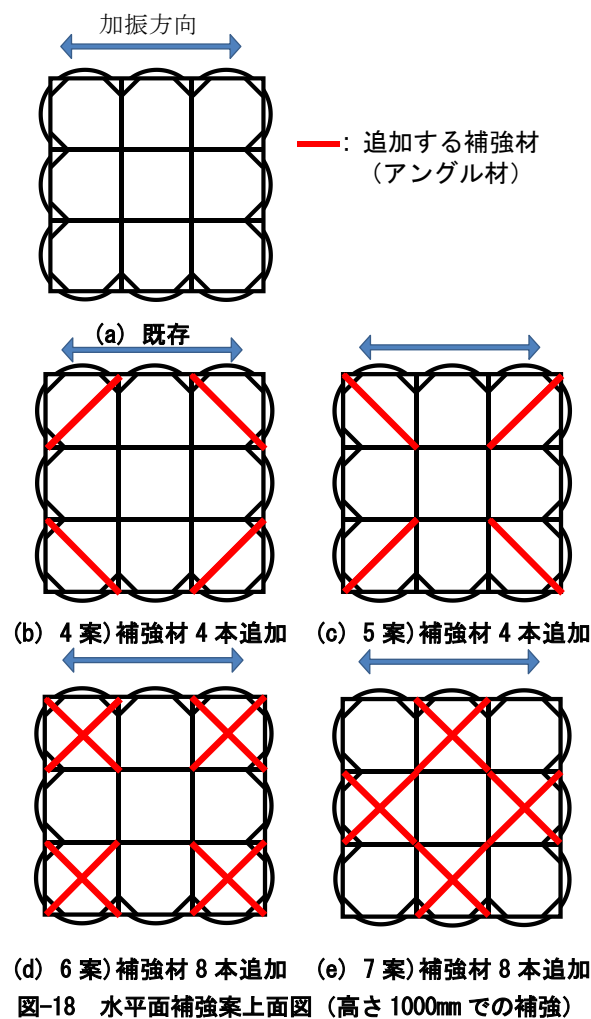
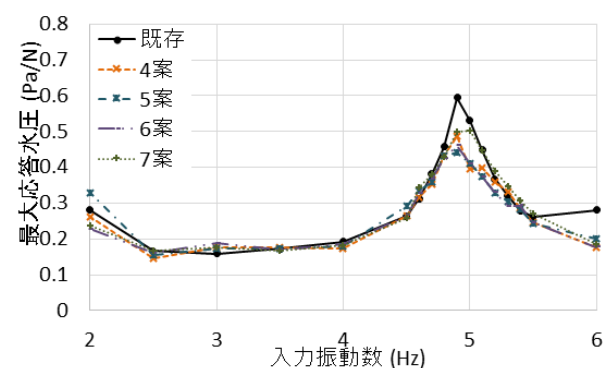
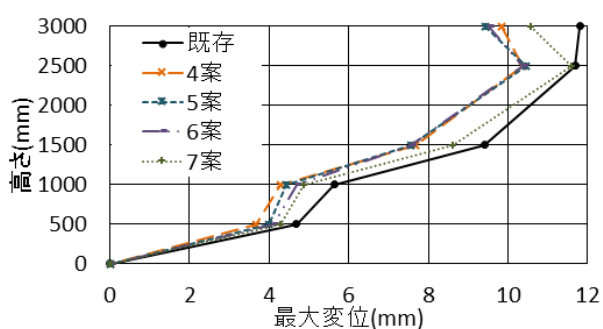


図-19 鉛直方向補強結果



(a) 応答水圧－振動数関係



(b) 高さ－変位関係

図-20 水平方向補強結果

5. 結論

本研究では、実物大のステンレス鋼製パネルタンクを用い、破損の原因解明および地震対策の検討を行った。これにより得た結論を以下に示す。

- 1) 動水圧とタンクのパネル接合部の開き量は連成しており、動水圧がタンク側板に大きな影響を及ぼす。よって、パネルの破損を防ぐには動水圧の発生を抑えることが重要である。今後の対策を検討するうえで側板にかかる動水圧を考慮するのが適切である。
- 2) 高減衰ゴムを用いた制振装置はバルジング現象時の動水圧を最大で約 70% 低減できる。広温度域 MP40 設置の際の水圧低減効果は、温度変化による水圧低減率の変化は 0～40℃ の全ての温度域で約 70% を示しほぼ一定であり、低減率も実験を行った 5 種類のゴムの温度域 4 パターンのうち最も大きい。
- 3) 追加部材による耐震は側板の最大変位を約 50% 低減できる。水平方向の補強の追加より、鉛直方向の部材を追加した場合のほうが高い変位抑制効果が得られた。

参考文献

- 1) m.miyake: “1964 年新潟地震における貯蔵タンクのオイルオーバー事例”, 世界の貯蔵タンク事故情報. <http://tank-accident.blogspot.com/>, 2014.5.24
- 2) 座間 信作: 2003 年十勝沖地震にみる石油タンク被害の特徴と対策, 物理探査, 2006 年 59 巻 4 号 pp.353-362
- 3) (社)リビングアメニティ協会給水タンク委員会: 東日本大震災における給水タンク調査, ALIA NEWSNo.128, pp.4-9, 2012.5.
- 4) 日本給水タンク工業会ホームページ: <http://www.kyuusui-tank.jp/index2.html>, 2014.1.25
- 5) 井上 涼介, 坂井 藤一, 大峯 秀一: 2011 年東北地方太平洋沖地震における水槽の広域被害および地震動特性との関連の分析, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4(地震工学論文集第 34 巻), I_764-I_773, 2015.
- 6) 平野 廣和: 貯水タンクを地震から守れ. <http://www.fps.chuo-u.ac.jp/~hrsk/sloshing/>(参照 2020-01-28)
- 7) 則竹 一輝, 鈴木 森晶, 奥村 哲夫, 佐口 浩一郎, 倉橋 奨: 矩形貯槽におけるスロッシング挙動とその抑制方法に対する検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2(応用力学論文集 Vol.15), I_785-I_794, 2012.8.
- 8) 遠田 他: 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 応用力学論文集, Vol.15, 2012.8
- 9) 曾根 龍太, 小野 泰介, 井田 剛史, 平野 廣和, 佐藤 尚次: 矩形断面貯水槽におけるスロッシング制振対策の検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69, No.2(応用力学論文集 Vol.16), I-833 I-843, 2013.
- 10) 箕輪 親宏, 清水 信之, 鈴木 純人: 長方形ステンレスパネル水槽の振動台実験, 日本機械学会論文集(C 編)67 巻 657 号, pp.1056-1063, 2002.4
- 11) 志賀 典親, 小野 泰介, 因 和樹, 井田 剛史, 平野 廣和: 振動実験と数値流体解析を用いたバルジングの特徴の把握, 応用力学論文集 Vol.21 (特集), 74 巻 2 号 p.I_285-I_294, 2018.
- 12) 渡邊 尚彦, 宮崎 泰樹, 行田 聡, 青木 大祐, 坂東 芳行: 内構材をもつ実矩形貯水槽の簡易バルジング応答推定, 構造工学論文集, Vol.65A, p.305-316, 2019.3
- 13) 黒田 亮, 青木 大祐, 鈴木 森晶: 矩形型貯水槽の耐震性能向上を目的とした手法に関する実験的研究, 愛知工業大学研究報告第 50 号, pp.147-156, 平成 27 年
- 14) 青木 大祐, 鈴木 森晶, 黒田 亮: 実物大貯水槽における耐震性能向上のためのフィルター設置に関する実験的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, No. 2(応用力学論文集 Vol. 18), I_49-I_58, 2015.

(受理 令和 2 年 3 月 19 日)